



Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM

Lena Sanders

► To cite this version:

Lena Sanders. Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM. SAGEO 2005, Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale, 2005, Avignon, France. pp.XX. halshs-00150153

HAL Id: halshs-00150153

<https://shs.hal.science/halshs-00150153>

Submitted on 29 May 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM

**Lena Sanders* - Jean-Marc Favaro*- Hélène Mathian*
Denise Pumain* - Benoît Glisse****

**UMR 8504 Géographie-cités
13 rue du four
75006 Paris
www.parisgeo.cnrs.fr*

***LIP6, université de Paris 6
8, rue du Capitaine Scott
75015 Paris
www.lip6.fr*

RÉSUMÉ. EUROSIM est un modèle multi-agents conçu pour simuler l'évolution à moyen terme du système des villes européennes. Les agents sont des entités collectives, les grandes villes caractérisées par leur taille et leur fonction dans le système des villes. Le succès de leurs interactions (échanges économiques modulés par des relations de proximité ou de réseau) détermine leur dynamique relative. Des outils d'analyse multiscalaire sont présentés en aide au calibrage et pour interpréter les sorties du modèle.

ABSTRACT. EUROSIM is a multi-agent model for simulating the evolution of the European urban system. The agents, the largest cities, are collective entities, whose attributes are size and function within the system of cities. Their interactions, based upon spatial proximity or connexity within networks, are controlling the relative dynamics. Multiscalar tools of analysis are presented here as calibrating devices and outputs of the model.

MOTS-CLÉS: villes, Europe, système multi-agents, agents collectifs, analyse multi-échelles

KEYWORDS: cities, Europe, multi-agent system, collective agents, multiscalar analysis

1. Des SMA pour modéliser la dynamique des systèmes de villes

Les théories de l'émergence inspirent de nombreux nouveaux modèles en analyse spatiale. L'hypothèse fondamentale est que le jeu des interactions entre les entités dites élémentaires d'un système produit des structures qui se maintiennent au cours du temps à un niveau d'organisation supérieur. Dans la plupart des applications dont l'objectif est de simuler l'émergence et/ou l'évolution d'une configuration spatiale (une ségrégation, une discontinuité, un gradient...), ces entités élémentaires sont des individus (par exemple des ménages, des entreprises) qui se déplacent dans l'espace, qui font des choix de cheminement ou de localisation en fonction de leurs préférences, de comportements d'imitation ou d'évitement, tels que formalisés notamment en micro-économie. Par exemple, on simule l'émergence et l'évolution de certaines configurations de l'espace résidentiel urbain, à partir des choix de localisation d'agents-ménages en fonction de contraintes (revenus, accessibilité) et de préférences relatives à la composition socio-économique des lieux voisins. Suivant les modèles, mécanismes de ségrégation (Portugali & al., 1997, Torrens 2001), d'agrégation (Arentze, Timmermans 2003), de compétition (Barros 2003) sont privilégiés pour définir des règles de prise de décision des individus. Certains modèles introduisent aussi des agents d'un niveau supérieur, les aménageurs, les promoteurs, dont les décisions influent également sur l'espace résidentiel sans que leurs propres choix résidentiels soient concernés (Arentze, Timmermans 2003, Benenson, Hatna 2003).

Dans le cadre des théories de l'émergence et des méthodes de l'intelligence artificielle, il est tout aussi légitime de considérer des entités collectives, par exemple des unités spatiales, comme formant le niveau élémentaire. Un tel choix implique une réflexion sur l'ontologie des objets sélectionnés pour simuler la dynamique d'un système spatial. En nous appuyant sur une théorie des systèmes de villes, nous faisons le choix de construire un modèle dans lequel les agents sont des entités d'échelle méso-géographique : des villes. L'objectif du modèle EUROSIM est de simuler, dans leurs grandes lignes, les trajectoires des villes européennes de 1950 à 2000 en termes de population et de richesse, et d'effectuer des projections jusqu'en 2050. Il ne s'agit pas de reproduire avec exactitude l'évolution observée au niveau de chaque ville, mais de rendre compte des changements structurels intervenus dans le système de villes en termes d'organisation hiérarchique, de diversité fonctionnelle, de trame spatiale, et de vérifier si les *types* de trajectoires urbaines dépendent de la spécialisation des villes, de leur taille, de leur position relative tant dans le contexte international que dans le contexte urbain local. Dans le présent article on insistera sur le fonctionnement du modèle et la mise au point d'une chaîne de traitement multiscalaire des sorties du modèle.

2. Le fonctionnement du modèle

2.1 Présentation générale

Le modèle EUROSIM est affilié au modèle SIMPOP (Sanders et al. 1997). A partir d'un semis de peuplement rural relativement régulier et uniforme, celui-ci simulait l'apparition et l'évolution de villes, celles-ci acquérant au cours du temps des fonctions de niveau de plus en plus élevé. Les règles d'évolution étaient formulées au niveau local en fonction des interactions entre les unités de peuplement. Ce modèle a permis de montrer comment des structures durables émergeaient au niveau meso-géographique à partir du jeu de ces interactions. La mise en place d'une organisation rang-taille et d'une organisation spatiale obéissant à certaines régularités d'espacement entre les villes suivant leur niveau hiérarchique en sont les principaux traits. Le modèle EUROSIM simule également la dynamique urbaine à partir des interactions entre les villes et leur environnement (non seulement le territoire environnant, mais aussi et surtout, les autres villes). Comme SIMPOP il s'inscrit dans une théorie évolutive des systèmes de villes (Pumain, 1997). Cette théorie rend compte de la persistance de l'organisation hiérarchique et de la trame spatiale des systèmes de villes, ainsi que de la relative durabilité des spécialisations fonctionnelles entre les villes, à partir de leurs relations de concurrence et d'émulation. Ces interactions suscitent une adaptation permanente et incrémentale de chaque ville aux changements sociaux et économiques qui constituent son environnement et qu'elle contribue à créer. Des effets de synergie dans cette dynamique produisent une évolution qui n'est pas continue mais qui apparaît au cours du temps sous forme de grands cycles d'innovation, susceptibles de renforcer la hiérarchie urbaine ou de faire émerger de nouvelles spécialisations. Développé suivant la même philosophie, le modèle EUROSIM diffère cependant du modèle SIMPOP dans ses objectifs : il s'applique sur une durée bien plus courte (une centaine d'années au lieu de deux millénaires) et sur l'ensemble précis des villes européennes¹ qui remplace le peuplement théorique utilisé pour les expériences précédentes. Conçu pour permettre le test de différents scénarios d'évolution, il suppose aussi un certain calage sur des données d'observation, et requiert un affinement de la définition des agents et de leurs attributs.

Dans le modèle, les activités des villes-agents sont de trois ordres : produire, échanger et consommer. L'évolution d'une ville en termes de croissance ou de déclin économique et/ou démographique dépend de sa capacité à mener à bien ces activités dans le cadre d'un environnement soumis à des chocs ou à des modifications exogènes, auxquels elle s'adapte. Ces changements peuvent être d'ordre économique (modification des structures de production ou de

¹ Europe élargie sans pays baltes

consommation, apparition d'innovations), politique (ouverture des frontières dans le cadre de l'intégration européenne), ou encore démographique (migrations).

2.2 Ontologie des objets

Les agents actifs dans le système sont des villes, (définies comme des agglomérations urbaines, entités comparables à l'échelle européenne, Cattán et al., 1999). Le niveau des agglomérations de plus de 200 000 habitants a été sélectionné comme étant le plus intensément concerné par les relations d'intégration qui construisent un réseau de villes européen (soit quelque 150 unités en 1950, 220 en 2000). Les autres villes (environ 5000 agglomérations de plus de 10 000 habitants) n'interviennent, avec des attributs très simplifiés, que dans la mesure où elles constituent un hinterland (débouché pour la production) pour ces villes moyennes et grandes.

Nous avons isolé dans le modèle deux entités importantes pour la dynamique : la gouvernance, qui représente la fonction de décision au sens large, qu'elle soit de niveau local, national ou mondial et d'autre part l'innovation, qui constitue le moteur de l'évolution, notamment en suscitant l'apparition de nouvelles fonctions urbaines (pour la période considérée, successivement les technopôles, à partir des années 1960, puis les nanotechnologies, biotechnologies, technologies de l'information et de la cognition dont l'essor est prévisible au début du XXI^e siècle).

Chaque ville est caractérisée par un ensemble d'attributs, qualitatifs (les fonctions urbaines), ou quantitatifs (population, richesse, nombre d'actifs travaillant pour chacune des fonctions). Les fonctions définissent la ou les spécialisations acquises par les villes et susceptibles d'orienter leur dynamique. Elles déterminent des formes d'interaction spatiale particulières, en sélectionnant un réseau de villes clientes, révisable à chaque itération du modèle, d'après des règles différentes selon trois types de fonctions :

- les *fonctions centrales* (d'après la théorie des lieux centraux) offrent des services de proximité, selon deux niveaux hiérarchisés : la fonction centrale 1 existe dans l'ensemble des villes et concerne leur seul marché interne, la fonction centrale 2 est plus sélective et a une portée régionale qui évolue d'une centaine de km en 1950 à 250 km en 2000.

- la *fonction capitale*, désigne un ensemble de services administratifs et de services publics. Cette fonction territoriale implique des interrelations entre chacune des villes d'un pays et sa capitale ;

- les *fonctions de réseau* désignent des activités d'un haut niveau de spécialisation, dont les portées sont au moins nationales, le plus souvent internationales. Le modèle EUROSIM formalise huit de ces fonctions de niveau supérieur qui représentent le secteur fondamental de l'économie et constituent le moteur du développement et de la richesse (alors que les activités plus banales

correspondant à ces secteurs de spécialisation sont regroupées avec les activités des fonctions centrales).

A chaque fonction, correspondent des paramètres mesurant la productivité, la demande et la part de population active. Le produit des échanges, dont le résultat détermine avec une certaine probabilité le processus de croissance urbaine, conduit à une accumulation de population et de richesse différenciée pour chaque ville. L'encadré 1 récapitule l'ensemble des variables et paramètres du modèle ainsi que leur notation.

z	: zone géographique d'appartenance de la ville , $z \in \{\text{Ouest, Est, Sud}\}$
s	: fonction de spécialisation de la ville ($s=1,10$ voir tableau 1)
P_{it}	: population de la ville i au temps t
a_{it}	: population active de la ville i au temps t avec : $a_{it} = 0.45 * P_{it}$
w_{it}	: richesse au temps t
l_{it}^s	: population active de la ville i dans la fonction s au temps t
O_{it}^s	: production de la ville i dans le secteur s au temps t ($O_{it}^s = o_{zt}^s \cdot l_{it}^s$)
D_{it}^s	: demande de la ville i dans le secteur s au temps t ($D_{it}^s = d_{zt}^s \cdot P_{it}$)
o_{zt}^s	: productivité par actif dans la fonction s au temps t dans la zone z
d_{zt}^s	: demande par habitant dans la fonction s au temps t dans la zone z

Encadré 1: Les variables et paramètres du modèle EUROSIM

2.3 Un pas de temps dans l'évolution d'une ville

La figure 1 résume l'ensemble des étapes correspondant à un cycle du modèle. Toutes les villes mènent ce cycle en parallèle. Lors d'un pas de temps (équivalent à un an) un certain nombre d'entre elles sont actives, à la fois comme productrices de biens et de services qu'elles proposent à un réseau de villes clientes, et comme clientes dans les réseaux constitués par une ou plusieurs autres villes.

- *initialisation des variables* : les variables sont calculées en fonction du bilan du cycle précédent suivant un ensemble de règles liant les taux d'évolution de la population totale de la ville, de sa richesse, et la répartition de sa population active par fonctions aux résultats de ce bilan. L'offre et la demande correspondant à la nouvelle situation et servant à enclencher l'étape suivante sont ensuite calculées.

- *constitution et/ou renouvellement du réseau d'échange associé à chacune des fonctions de la ville* : Ces réseaux sont déterminés à partir de logiques territoriales contraints par la structure du réseau des villes (fonctions centrale 2

et *capitale*), ou sélectionnés selon des logiques propres à chaque fonction (tableau 2).

- *marché d'échanges* : L'offre produite par une ville est proposée par voie de messages aux agents-villes appartenant à son réseau de clients; la ville qui reçoit plusieurs propositions, opère une sélection en fonction de certains critères et exprime une demande précise par envoi de message aux villes « offreuseuses » ; les ventes sont effectuées au prorata des demandes selon une procédure itérative;

- *bilan des échanges* : les quantités vendues ou invendues, les demandes satisfaites ou insatisfaites sont prises en compte dans les règles de calcul des gains de richesse et de population de chaque ville, ainsi que dans l'évolution de sa population active.

Dans cette première version du modèle, c'est au niveau du marché d'échange que l'apport des SMA est le plus prégnant. Le protocole de communication permet de simuler efficacement la circulation de l'information dans le système. A chaque itération un nombre important d'échanges a en effet lieu entre les agents-villes, afin de parvenir à un ajustement entre les offres et les demandes exprimées simultanément en tous les lieux, tout en tenant compte d'un système de préférence pour la réalisation de l'opération commerciale (les villes demandeuses ont à choisir entre plusieurs offres). Précisons que cette procédure se fait sans recherche d'optimisation et qu'elle n'aboutit pas nécessairement à une situation d'équilibre général entre l'offre et la demande sur les différents marchés. Dans cette version de EUROSIM seules des règles générales de fonctionnement sont introduites dans la « gouvernance ». La formalisation de celle-ci permet également d'introduire des mécanismes de décision spécifiques, liés au milieu urbain local. Cette fonctionnalité sera utilisée une fois que les grandes lignes de l'évolution du système urbain européen seront calibrées.

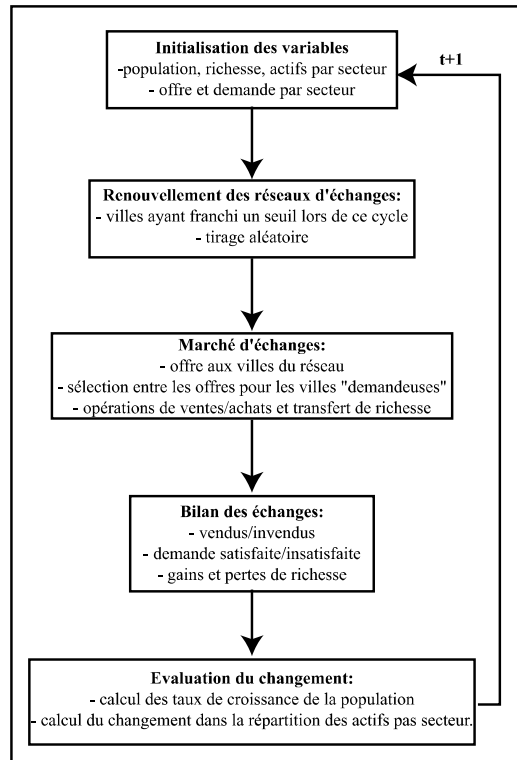


Figure 1 : Schéma des principales étapes d'un cycle (une itération) du modèle pour une ville i

2.4 La constitution des réseaux d'échange et le processus d'échange

La définition des interactions entre les villes mérite une présentation plus détaillée, car elle est au cœur de la dynamique du système dans le modèle EUROSIM. Chaque ville productrice sélectionne son propre réseau d'échange (villes acheteuses) pour chacune de ses fonctions. Ce réseau de villes clientes est dynamique : il est susceptible de changer à chaque itération. Les critères qui président à sa formation relèvent de deux logiques différentes, fondées sur des attributs (taille, fonctions) ou sur une situation (distances, appartenances territoriales), qui peuvent se combiner, selon la fonction considérée (tableau 1).

Tableau 1: Règles de sélection des villes composant le réseau d'échange d'une ville spécialisée

Spécialisations	Type d'interactions (aire, territoire, réseau)	Critères de sélection du marché
Centrale 1	Pas de réseau d'échange, marché interne uniquement	
Centrale 2	Aires	Voisinages évolutifs (100 à 200 km de 1950 à 2000)
Capitale	Territoire national	
Industrie 1	Réseau	Grandes villes et autres villes spécialisées dans l'industrie (sélection aléatoire)
Industrie 2	Réseau	Grandes villes et autres villes spécialisées dans l'industrie (sélection aléatoire)
Tourisme 1	Territoire national et pays voisins	Toutes les villes concernées
Tourisme 2	Réseau	Grandes villes et villes riches (sélection aléatoire)
Logistique	Territoire national et pays voisins	Toutes les grandes villes
Place financière internationale	Réseau	Toutes les villes spécialisées industrie ² , tourisme ² , transport, technopole, NBIC, capitale
Technopole	Réseau	Villes spécialisées industrie ² , technopole, NBIC, capitale, et une part des grandes villes (sélection aléatoire)
NBIC ²	Réseau	Toutes les villes avec la fonction NBIC et toutes les villes de plus de 1 000 000 hab.

NB: L'expression "grandes villes" renvoie aux agglomérations de plus de 200 000 hab.

3. Entrées du modèle

Pour modéliser et simuler l'évolution du système des villes européennes, le modèle EUROSIM s'appuie sur de nombreuses données réelles : la population et la spécialisation économique des villes à la situation initiale (1950), des coefficients de productivité et de demande par fonction, des projections d'évolution démographique.

² NBIC: Nanotechnologies, Biotechnologies, technologies de l'information et de la Cognition

3.1 La situation initiale

Définir la situation initiale suppose un travail préalable d'harmonisation dans la mesure où les données relatives aux populations et aux fonctions des villes ne sont pas produites avec des définitions comparables par les différents Etats européens. Nous nous sommes appuyés sur les travaux antérieurs de comparaison des villes européennes (base Geopolis de F. Moriconi-Ebrard, 1994 pour la population urbaine depuis 1950, Cattani et al., 1999, les travaux du SDEC, 1999 et Rozenblat et Cicille, 2004 pour l'identification des fonctions urbaines spécialisées), ainsi que sur les bases de données nationales et régionales d'Eurostat, de l'ONU et de l'OIT pour les mesures de richesse, de productivité et de demande par habitant. Ces dernières informations sont répertoriées pour des secteurs d'activité économique (dans des nomenclatures qui ont changé au cours des cinquante dernières années) qui ne correspondent que très imparfaitement aux définitions des fonctions utilisées dans EUROSIM. Nous avons donc procédé à une série d'approximations, en retenant principalement des ordres de grandeur qui permettent de comparer les fonctions urbaines dans leur dynamique d'une part, et les pays et les villes dans leur poids et leurs niveaux de vie d'autre part.

3.2 Les paramètres de productivité et de demande

Les paramètres de productivité et de demande par fonction urbaine jouent un rôle particulièrement important dans le modèle car ils déterminent (avec les procédures de constitution des réseaux) les conditions d'échange entre les villes. Il s'agit de paramètres exogènes et dynamiques : ils sont mis à jour à chaque période, et leurs variations représentent de façon simplifiée l'évolution du système économique (structure de la consommation et de la production). L'estimation de ces paramètres s'est faite en utilisant des techniques économétriques (lissage exponentiel).

Après calibrage, ces séries temporelles de paramètres sont introduites dans le modèle sous forme de polynômes à plusieurs degrés permettant de construire aisément différents scénarii.

4 Sorties et calibrage: mise au point d'une chaîne de traitement et de visualisation multiscalaire

La phase de calibrage de ces types de modèles reste une étape complexe. Elle repose sur une série de mesures clés associées aux dimensions caractéristiques du système qu'il s'agit de reproduire ou d'estimer. Nous avons mis au point des outils graphiques, statistiques et cartographiques qui sont à la fois des aides au calibrage et des « sorties » de simulation. Le tableau 3 résume ces différentes sorties, qui permettent des contrôles de type géographique ou thématique.

Tableau 3: Un rapport de simulation multiscalaire

Niveau géographique Caractéristiques	Niveau macro <i>- l'Europe</i>	1 ^{er} niveau méso <i>- les zones</i>	2 ^e niveau méso <i>- les pays</i>	Niveau micro <i>- les villes</i>
Population et richesse	<ul style="list-style-type: none"> - Trajectoires globales - Analyse de la hiérarchie: graphiques rang-taille et indices de primatie - Analyse de la concentration: tableaux et graphiques illustrant l'évolution du haut de la hiérarchie. 			- Trajectoires
Secteurs d'activité	<ul style="list-style-type: none"> - Répartition de la population active selon les 11 secteurs d'activité. - Décomposition de l'offre et la demande selon différentes composantes. - Analyse des différenciations des profils économiques des villes et de leurs évolutions dans le temps. 			<ul style="list-style-type: none"> - Cartes de spécialisation - Profils de répartition de la population active.
Réseaux d'échanges	- Cartes générales	- Echanges transfrontaliers	- Cartes	- Taille et structure des réseaux

4.1 Cohérences multiscalaires

L'analyse simultanée des niveaux macro (Europe) et micro (villes) permet de contrôler globalement le modèle dans l'évolution de ses ordres de grandeur caractéristiques, tout en s'assurant de la diversité des trajectoires obtenues pour chaque ville. Il devient ainsi possible d'inférer comment le niveau micro (la ville) contribue à l'évolution du niveau macro (le système des villes). Le contrôle se fait jusqu'en 2000 par comparaison avec les données observées. La figure 3 présente un exemple pour les variables cibles "population" (courbes noires) et "richesse" (courbes rouges). Des graphiques et indicateurs résumés permettent ainsi d'observer, pour chaque niveau géographique, comment évoluent la concentration et la hiérarchisation du système. Ces représentations vont permettre de montrer comment la nature du fonctionnement des interactions entre les villes influe sur les propriétés méso-géographiques du système urbain.

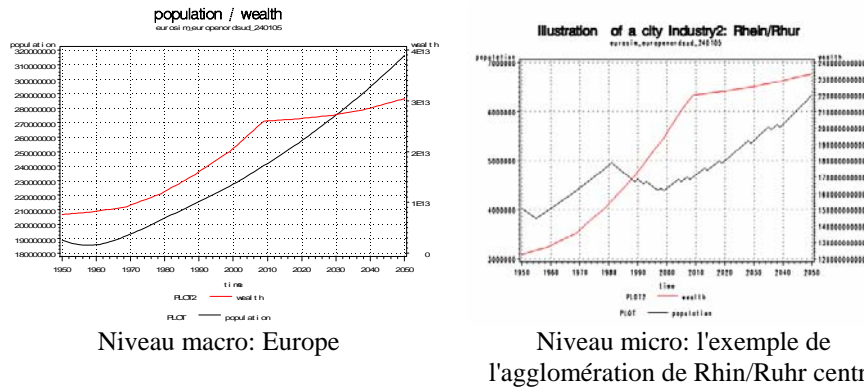


Figure 3: Evolutions des populations et richesses.

4.2 Les spécialisations

Les activités et les échanges sont le moteur de la dynamique. Le fonctionnement de chaque activité est caractérisé par une productivité et une demande par habitant, puis par une logique de sélection et d'échanges de ces biens. Chaque fonction a été calibrée successivement. Une décomposition des différentes composantes de l'offre et de la demande permet d'évaluer la capacité du système à évoluer, en vérifiant si le potentiel d'offre est adapté à la demande. La figure 4 illustre ces décompositions pour la fonction industrielle de niveau 2.

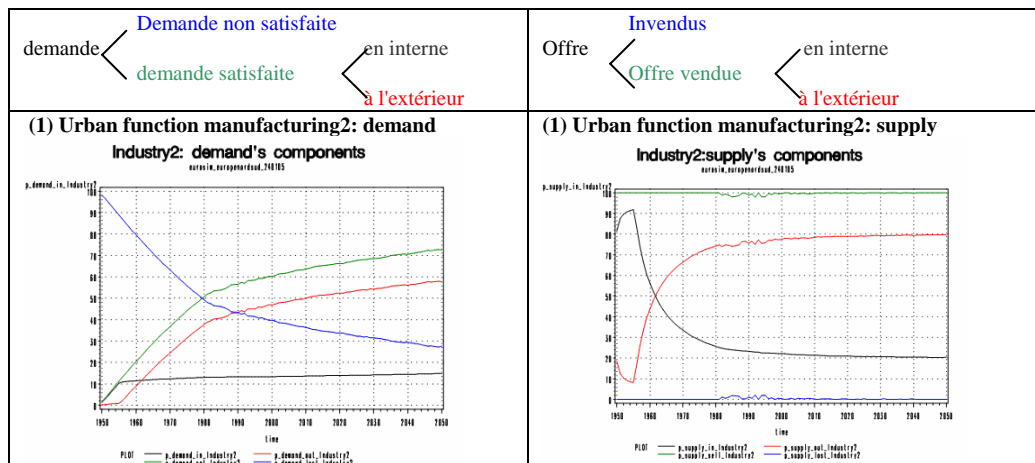


Figure 4: Décomposition de l'offre et de la demande par secteur d'activité.

4.3. Logiques d'échanges entre les villes

Une série de cartes permet de visualiser les inscriptions spatiales des échanges effectifs par type de fonction (figure 5). On peut ainsi contrôler les logiques associées à chaque fonction, et évaluer les parts relatives de l'aléa, du renouvellement et des persistances dans l'organisation des marchés d'échanges. Ces cartes sont utilisées à différents échelons géographiques: global (figure 5a) ou régional (figure 5b : cette dernière carte montre un zoom sur l'espace transfrontalier franco-belge, pour la fonction centrale de niveau supérieur).

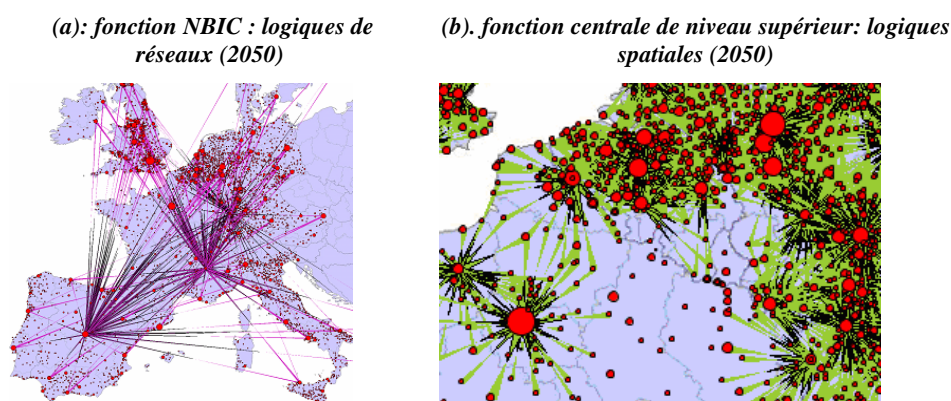


Figure 5: Inscription dans l'espace des flux d'échanges entre les villes..

5. perspectives

De nombreux problèmes restent à résoudre au vu des résultats des premières simulations. Les systèmes urbains sont des entités tellement complexes, les interactions entre les villes sont à la fois si nombreuses et si mal connues et mesurées, que la sélection des entités pertinentes comme celle des règles supposées intervenir dans la dynamique des villes comportent une part d'arbitraire, ou au mieux d'intuition non démontrable. Les systèmes multi-agents restent à cet égard une forme particulièrement vulnérable de modélisation, dans la mesure où il n'existe pas de méthode qui permette de valider leurs résultats, mais ce sont en même temps des outils irremplaçables pour résumer et articuler les connaissances établies au sujet des interactions spatiales. La modélisation d'interactions d'amplitude et de portée variable et de leurs effets sur un très grand nombre de lieux résiste en effet à toute modélisation analytique, et les SMA sont les seuls à permettre une investigation dans ce champ. La difficulté majeure du moment est de transcrire des indications de dynamique urbaine, qui ont généralement été obtenues à partir d'observations statistiques transversales, plus rarement de co-évolutions (informations longitudinales), et plus rarement encore à partir de mesures d'échanges ou de flux réels, en termes de règles d'interaction entre les villes.

Par ailleurs, ce type de modélisation plus qualitative, peut apparaître plus simple. Or elle nécessite cependant une longue période d'élaboration constituée d'échanges fréquents entre des spécialistes d'une grande variété disciplinaire (géographie, informatique, statistique, économie), au cours desquels différents niveaux de formalisation sont confrontés. Ainsi il apparaît aujourd'hui, que c'est par les questions que sa réalisation a soulevées, comme par les résultats de ses applications à différentes simulations, que ce type de modèle pourra aider à faire progresser en retour une théorie des interactions entre des entités géographiques.

6. Bibliographie

- Arentze T., Timmermans H., 2003, Modeling agglomeration forces in urban dynamics: a multi-agent system approach, Proceedings of the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban management, Sendai, Japon.
- Barros J., 2003, Simulating Urban Dynamics in Latin American Cities, Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation, Southampton (www.geocomputation.org/2003/)
- Benenson I., Hatna E., 2003, Human choice behavior makes city dynamics robust and, thus, predictable, Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation, University of Southampton.
- Cattan N. Pumain D. Rozenblat C. Saint-Julien T. 1999, Le système des villes européennes. Paris, Anthropos, coll. Villes (1^e édition 1994).
- Moriconi-Ebrard F. 1994, Geopolis, pour comparer les villes du monde. Paris, Anthropos.
- Portugali J., Benenson I., Omer I., 1997, Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in a self-organizing city, Environment and Planning B, 24, 263-285
- Pumain D., 1997, Vers une théorie évolutive des villes , L'Espace Géographique, num.2 ; 119-134 .
- Rozenblat C., Cicille P., 2003, Les villes européennes. Analyse comparative. Rapport d'étude DATAR, Paris, La Documentation Française.
- Sanders L., Pumain D., Mathian H., Guérin-Pace F., Bura S. 1997, SIMPOP, a multi-agents system for the study of urbanism. Environment and Planning B, 24, 287-305.
- Sanders L. et al, 2005, Dynamics of the European urban network, year 2 report, european contract EVG3-2001-00024, Time-Geographical approaches to Emergence and Sustainable Societies (TiGrESS).
- Torrens P.M., 2001, Can geocomputation save urban simulation? Throw some agents into the mixture, simmer and wait..., CASA working paper n°32, <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper31.pdf>

SDEC, 1999, Schéma de Développement de l'Espace Communautaire. Commission européenne, DGXVI.

Sources

ONU, National Account Main Aggregates Database (1970-2003)
<http://unstats.un.org/unsd/snaama/Introduction.asp>

Office International du Travail, LABORSTA Database (1950-2000), Vol. 3 & 10
<http://laborsta.ilo.org>

EUROSTAT, NewChronos Database (1980-2003), <http://epp.eurostat.cec.eu.int>